

Análise do Comportamento de Aterros Executados Sobre Solo Tratado com CPR *Grouting*

Leonardo Cunha Gondariz

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: leogondariz@gmail.com

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: sieira@eng.uerj.br

André Pereira Lima

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: andre.pereira@uva.com.br

RESUMO: A técnica de Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*) consiste no bombeamento de argamassa no interior da camada de solo mole sob elevadas pressões, intercaladas com geodrenos. O tratamento resulta na diminuição do índice de vazios da camada compressível e no aumento da resistência, conduzindo a uma redução significativa dos recalques. O presente trabalho tem como objetivo analisar numericamente o comportamento de dois aterros experimentais instrumentados (aterro teste A e aterro teste B), localizados no Recreio dos Bandeirantes, RJ. O aterro teste A foi construído sobre uma camada de argila mole de 8,0 m de espessura, onde foram instalados geodrenos para a aceleração dos recalques. Na área do aterro teste B, além da instalação de geodrenos, foi realizado o tratamento do solo compressível através da técnica de Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*), de forma a minorar significativamente os recalques previstos. Os resultados permitiram quantificar o ganho da rigidez do solo após o tratamento com CPR *Grouting*, conduzindo a reduções significativas de recalque.

PALAVRAS-CHAVE: Consolidação Profunda Radial, Aterros Sobre Solos Moles, Adensamento

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de tratamento de solos moles permitem a viabilização de projetos em terrenos com baixa capacidade de suporte, aumentando a resistência e diminuindo a deformabilidade do solo. Dentre as diferentes técnicas de tratamento de solo mole, este trabalho aborda a Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*).

O método consiste no bombeamento de argamassa no interior da camada de solo mole sob elevadas pressões, tendo como consequência a redução do excesso de poropressão induzido pela expansão da argamassa no solo compressível. O processo de redução de poropressão é acelerado mediante o emprego de drenos verticais pré-fabricados, que

são instalados no interior do solo antes da execução das colunas de argamassa. O processo de execução da técnica de CPR *Grouting* é constituído basicamente de três etapas executivas (Figura 1): instalação dos geodrenos, preparação da argamassa e bombeamento da argamassa no interior do solo mole.

A injeção de argamassa sob alta pressão faz com que se formem bulbos de pressão, que comprimem o solo lateralmente, causando elevados deslocamentos no entorno do bulbo. Os bulbos de compressão são formados de baixo para cima através de um alinhamento vertical do equipamento, e são locados entrepostos aos drenos já instalados. O volume do bulbo é, geralmente, de 800 a 1.000 litros e as pressões de injeção variam de 100 kPa a

1.000 kPa, reduzindo à medida que se aproxima da superfície (Almeida e Riccio, 2012).

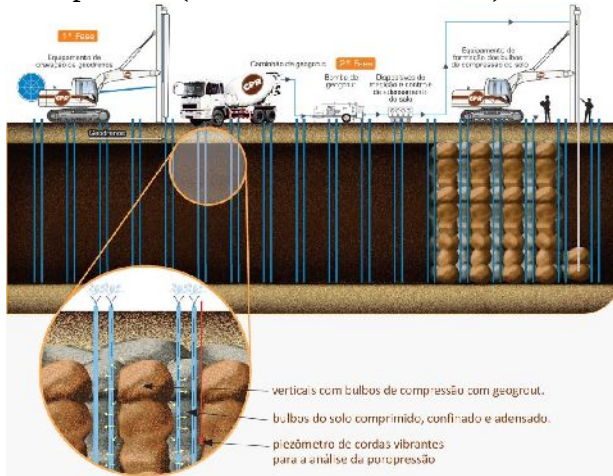


Figura 1. Processo de execução da técnica CPR Grouting (Engegraut, 2015).

No processo de execução do bulbo de compressão, inicialmente há um aumento da poropressão. A partir do processo de adensamento, ocorre a percolação da água em direção aos drenos instalados. À medida que a água vai sendo expulsa pelos drenos, há um processo gradual de transferência de carga para o arcabouço sólido, aumentando assim, a tensão efetiva do solo.

Com o acréscimo de tensão no solo gerado pelas colunas de compressão de argamassa, ocorre uma diminuição do índice de vazios da camada compressível e um aumento da resistência. Esta melhoria do solo resulta em uma significativa diminuição da magnitude dos recalques.

Os geodrenos são instalados na área de aplicação da técnica, utilizando-se equipamentos apropriados. Quando o terreno apresenta camada superficial resistente, como por exemplo um aterro, torna-se necessária a execução de pré-furos, com dimensões compatíveis com às dimensões do mandril, que atravesse a camada resistente até ser atingido o topo da camada de solo mole.

Após a aplicação do CPR Grouting, o resultado é a formação de um compósito constituído por um material rígido (colunas de compressão) e um material adensado, comprimido e confinado (solo tratado).

Almeida e Riccio (2012) acrescentaram que o novo material compósito tem suas propriedades de rigidez e resistência melhoradas, tendo como consequência, a redução de magnitude dos recalques e o aumento no fator de segurança em termos de estabilidade do aterro (Figura 2).

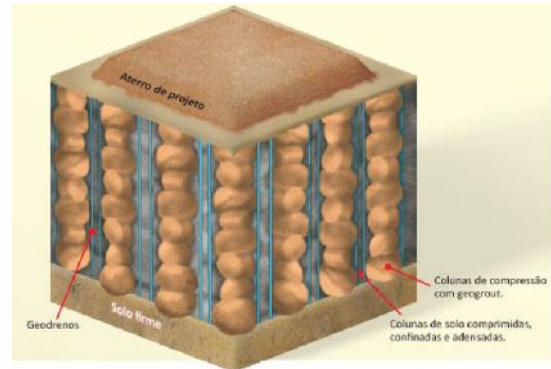
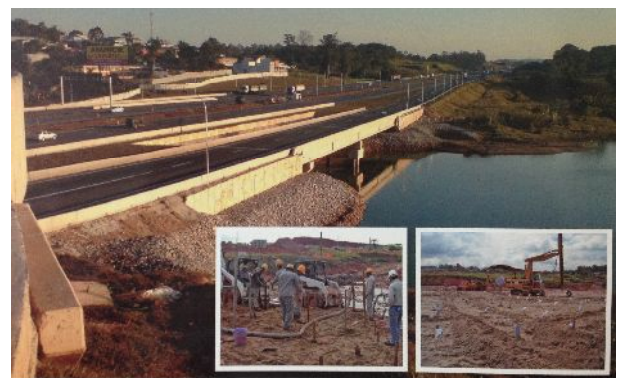


Figura 2. Camada de solo tratada com CPR Grouting (Engegraut, 2015).

A Figura 3 apresenta imagens de obras que foram viabilizadas com a técnica CPR Grouting. Chavão (2015) reúne as principais obras executadas no Brasil com a técnica de consolidação profunda radial (CPR Grouting).



(a) Parque "Rock in Rio"



(b) Rodoanel Sul – Lote 3

Figura 3. Obras viabilizadas com a técnica CPR Grouting

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A necessidade de um estudo comparativo da eficiência das técnicas de tratamento de solos moles gerou a construção de dois aterros experimentais, sendo um sobre solo de fundação tratado com técnica de Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*), e o outro sobre solo de fundação com geodrenos para aceleração dos recalques.

Os aterros experimentais foram implementados na área de uma construção localizada no bairro do Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro (RJ). O Recreio dos Bandeirantes é um dos bairros que constituem a planície da Baixada de Jacarepaguá (Figura 4).

A área em estudo pertence a uma planície costeira com cerca de 120 km², coberta de sedimentos cenozoicos, sendo circundada por elevações dos maciços da Tijuca (leste, constituindo o Parque Nacional da Tijuca) e Pedra Branca (oeste), Almeida et al. (2001). A Figura 5 apresenta a localização do Recreio dos Bandeirantes e dos maciços.

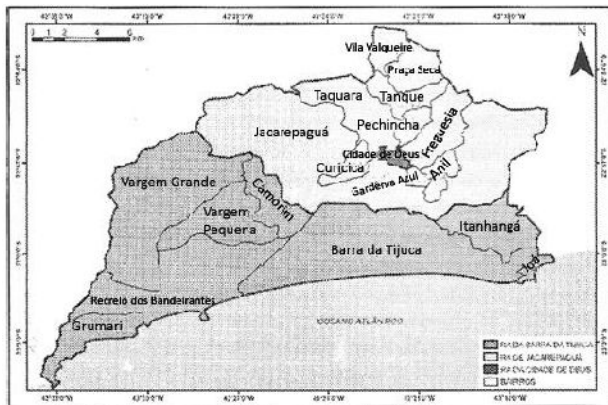


Figura 4. Bairros que formam a Baixada de Jacarepaguá.

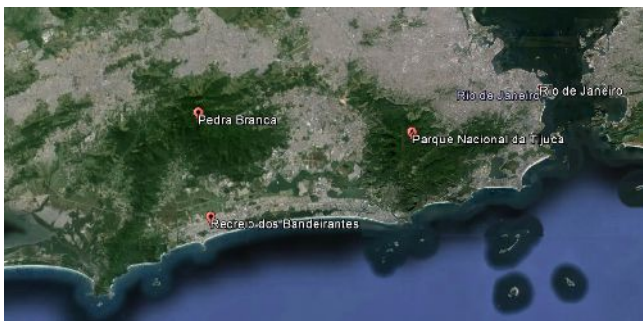


Figura 5. Recreio dos Bandeirantes circundado pelos maciços (Google Earth, 2015).

2.1. Caracterização Geotécnica da Região

Para identificação dos materiais existentes e caracterização da região em estudo, foi realizada uma ampla campanha de sondagens com objetivo de realizar um mapeamento geológico-geotécnico. Além disso, foram realizados ensaios pressiométricos (PMT), e coletadas amostras para realização de ensaios de adensamento oedométricos, em laboratório.

A Figura 6 apresenta as isoespessuras de argila mole em toda extensão do empreendimento, definidas com base nas sondagens à percussão e a Figura 7 apresenta o perfil geológico geotécnico da área onde os aterros experimentais foram assentados. Pode-se observar a presença de uma camada de argila muito mole com aproximadamente 8,0 m de espessura, e N_{SPT} igual a zero. O nível d'água foi detectado na superfície do terreno.

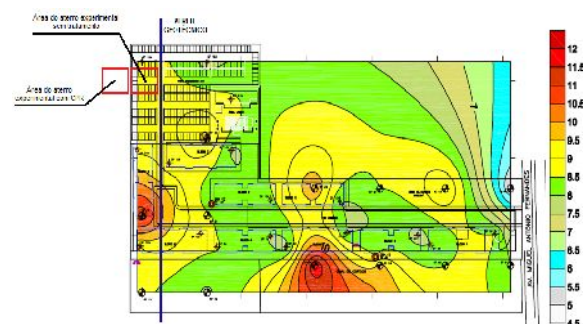


Figura 6. Curvas de isoespessura de argila mole.

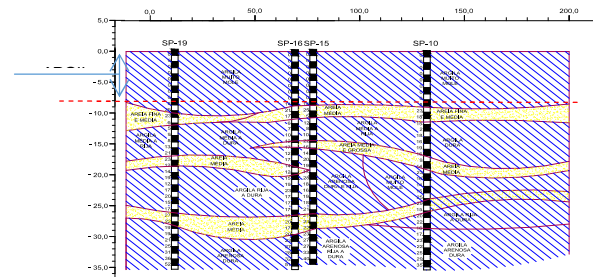


Figura 7. Perfil geológico geotécnico: área dos aterros experimentais.

3 ATERROS EXPERIMENTAIS

A construção dos aterros experimentais teve início no dia 14 de Agosto de 2014, com a demarcação de suas respectivas áreas.

Após a demarcação das áreas, iniciou-se a cravação dos geodrenos na área destinada aos aterros. Os geodrenos foram instalados com

espaçamento de 1,50 m, e sua cravação foi finalizada no dia 18 de Agosto de 2014.

No dia 20 de Agosto de 2014, foram instalados os instrumentos para monitorar o desenvolvimento dos recalques, deslocamentos horizontais e poropressões na área sem tratamento.

No dia 03 de Setembro de 2014, realizou-se o tratamento do solo com *CPR Grouting* na área destinada ao aterro com tratamento. Nesta área, foram executadas verticais de bulbo de compressão com diâmetro de 1,20 m; dispersas em malha quadrada, com espaçamento entre colunas de 3,0 m. Nesta mesma data, iniciou-se a instalação dos instrumentos para monitorar o desenvolvimento do recalque, deslocamentos horizontais e poropressão no aterro tratado com *CPR Grouting*.

A execução ou elevação do aterro na área sem tratamento de *CPR Grouting* teve início no dia 13 de Setembro de 2014 e término no dia 15 de Setembro de 2014. Já a execução do aterro na área tratada com *CPR Grouting* ocorreu entre 16 e 19 de Setembro de 2014.

A Figura 8 ilustra o aterro teste finalizado. A Tabela 2 sumariza as etapas executivas, com suas respectivas datas.



Figura 8. Aterro teste finalizado, com os instrumentos instalados e sobrecarga aplicada

Tabela 2. Histórico de execução dos aterros

Data	Etapas
14/08/2014	Demarcação das áreas
18/08/2014	Finalização da cravação dos drenos
20/08/2014	Instalação dos instrumentos na área sem tratamento
03/09/2014	Tratamento do solo com <i>CPR Grouting</i> e instalação dos instrumentos na área tratada
13/09/2014 a 15/09/2014	Execução do aterro na área sem tratamento
16/09/2014 a 19/09/2014	Execução do aterro na área com tratamento

4 INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO

A instrumentação de campo tem como objetivo monitorar o comportamento do solo ao longo de tempo, de modo a verificar se as premissas adotadas em projeto são representativas.

Para o monitoramento dos aterros experimentais, foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Piezômetros, para monitoramento das poropressões;
- Placas de recalque, aranhas magnéticas e perfilômetros, para monitoramento dos recalques;
- Inclinômetros, para monitoramento dos deslocamentos horizontais.

As Figuras 9 e 10 apresentam as plantas de localização dos instrumentos do aterro sem tratamento, e do aterro com *CPR Grouting*, respectivamente.

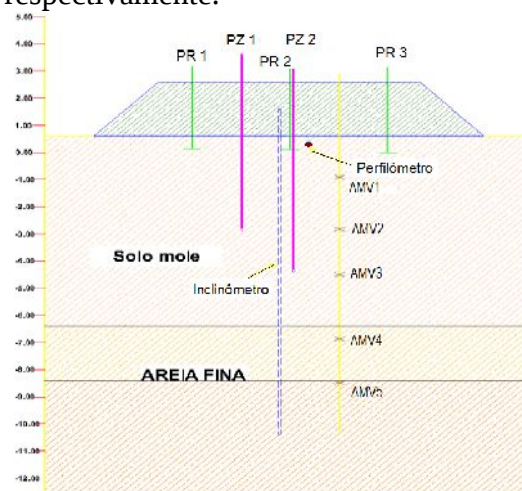


Figura 9. Localização da instrumentação do aterro experimental sem tratamento (Chavão, 2015).

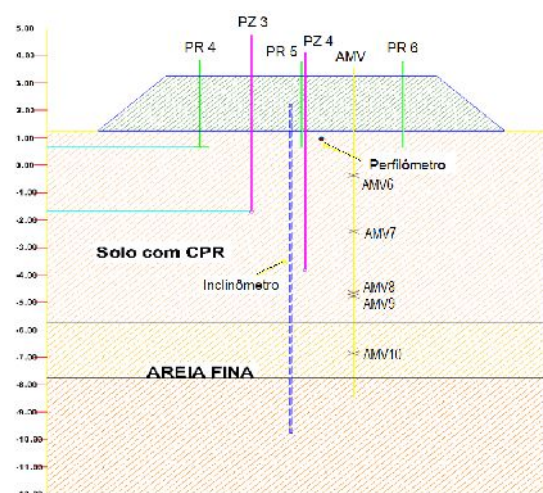


Figura 10. Localização da instrumentação do aterro experimental com *CPR Grouting* (Chavão, 2015).

5 ANÁLISE NUMÉRICA

A sequência construtiva dos aterros experimentais foi reproduzida com o auxílio do programa computacional Plaxis, de elementos finitos. Os resultados das análises numéricas foram confrontados com as medições de campo. O objetivo consiste em estimar parâmetros de compressibilidade para o solo mole tratado com a técnica de Consolidação Radial Profunda (CPR *Grouting*).

A seleção dos parâmetros geotécnicos para a região na qual se inserem os aterros experimentais foi baseada nas informações de campo, de laboratório, por retroanálises realizadas por Chavão (2015) e por valores de parâmetros anteriormente definidos por outros autores para a região do empreendimento. Para a adoção do modelo Mohr Coulomb para representação da argila mole sem e com tratamento, faz-se necessária a estimativa do módulo de deformabilidade (E). Para tanto, foram considerados os resultados obtidos pelos ensaios pressiométricos. A Figura 11 ilustra os valores de E fornecidos pelo pressiômetro para o solo sem tratamento, e os valores adotados nas análises numéricas. A Tabela 3 reúne os parâmetros adotados para a argila mole sem tratamento no modelo Mohr Coulomb.

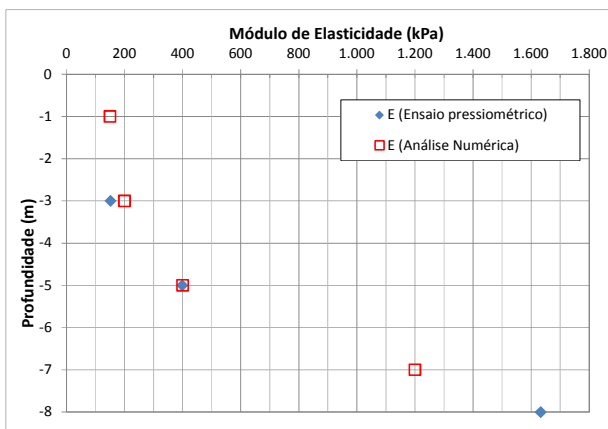


Figura 11. Resultados dos Ensaios Pressiométricos: Argila pré-tratamento com CPR *Grouting*

Os parâmetros do solo tratado também foram estimados a partir dos resultados dos ensaios pressiométricos, executados na área pós-tratamento. Com base nos resultados, foi definido um valor de módulo de deformabilidade igual a 6.000 kPa para o solo

tratado com CPR *Grouting*, constante com a profundidade, uma vez que se espera uma homogeneização do solo ao longo do tempo.

Tabela 3. Parâmetros representativos da argila sem tratamento: Modelo Mohr Coulomb

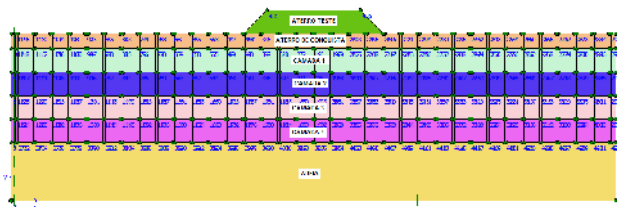
Parâmetros	Argila mole			
	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4
Espessura da camada (m)	2,0	2,0	2,0	2,0
γ_{sat} (kN/m ³)	12,81	12,81	13,09	13,09
k_h (m/dia)	$3,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-5}$
k_v (m/dia)	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
E (kPa)	150	200	400	1200
OCR	2,60	2,60	1,40	1,40

Inicialmente, procedeu-se à reprodução do comportamento do aterro teste A, sem tratamento, a partir dos parâmetros selecionados como representativos da argila mole. Nesta etapa, os resultados da instrumentação de campo foram confrontados com as previsões numéricas de recalques, calibrando-se o modelo.

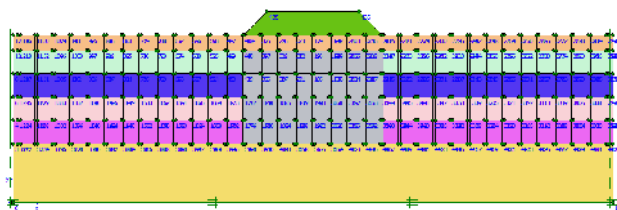
Em seguida, com os parâmetros geotécnicos estimados de acordo com a análise numérica do Aterro Teste A, procedeu-se à análise numérica do Aterro Teste B. Esta etapa buscou definir parâmetros de deformabilidade para o solo tratado, de forma a quantificar o ganho de rigidez ocasionado pelo tratamento.

A Figura 12 apresenta as geometrias dos aterros teste A e B, adotadas nas análises numéricas. O perfil geotécnico consiste em uma camada de argila mole de 8,0 m de espessura, subdivida em 4 camadas de 2,0 m, sobrejacente a uma camada de areia. No interior da camada mole, foram introduzidos drenos verticais com espaçamentos iguais a 1,5 m. Acima da camada argilosa, observa-se a presença de um aterro de conquista de 1,0 m de espessura. O nível d'água foi detectado na superfície do terreno. A região tratada com CPR *Grouting* foi localizada abaixo da área que delimita o aterro teste com parâmetros de resistência e deformabilidade compatíveis com o comportamento de um solo compressível tratado com a técnica CPR *Grouting*.

A Figura 13 compara a evolução dos recalques com o tempo, prevista numericamente com valores medidos nas placas de recalque PR1, PR2 e PR3. O programa PLAXIS forneceu um valor de recalque final de 50,2 cm; enquanto as placas PR1, PR2 e PR3 apresentaram, respectivamente, recalques de 49,3 cm, 49,7 cm e 48,5 cm. Observa-se um ajuste satisfatório entre os resultados.



(a) Aterro Teste A



(b) Aterro Teste B

Figura 12. Geometrias adotadas nas análises numéricas

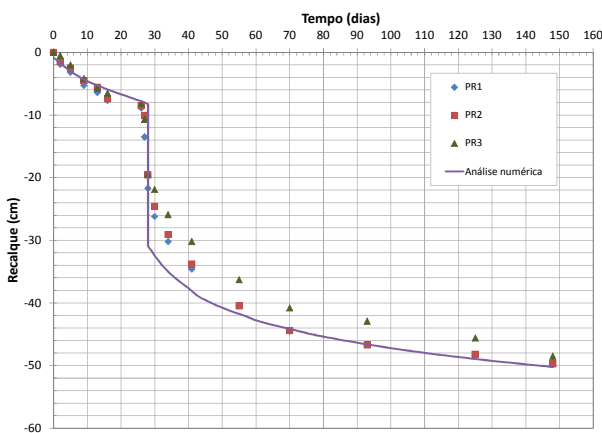


Figura 13. Comparação entre a previsão numérica e os resultados experimentais das placas de recalque: Aterro Teste A

A Figura 14 compara a evolução dos deslocamentos verticais ao longo da base do aterro com o tempo prevista numericamente com valores medidos com o perfilômetro. As análises numéricas forneceram um valor máximo de recalque final no centro da base do aterro com valor de 48,8 cm, enquanto as leituras do perfilômetro mostram que o maior deslocamento vertical ocorreu no centro do

aterro, com valor máximo de 46,3 cm. Mais uma vez, observa-se um ajuste adequado, sugerindo que os parâmetros e o modelo adotados são representativos do comportamento do solo sem tratamento.

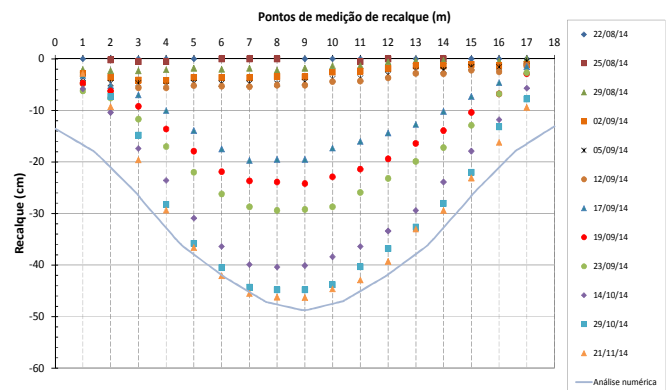


Figura 14. Comparação entre a previsão numérica e os resultados experimentais do perfilômetro: Aterro Teste A

Após a definição satisfatória dos parâmetros geotécnicos e dos modelos constitutivos, da geometria e das condições de contorno, a partir da análise numérica do Aterro Teste A, procedeu-se à análise numérica do Aterro Teste B, com o objetivo de obter parâmetros de compressibilidade das camadas de solo compressível tratadas com a técnica CPR Grouting.

A Figura 15 compara a evolução dos recalques com o tempo prevista numericamente com valores medidos nas placas de recalque PR4, PR5 e PR6. Para análise numérica, o programa Plaxis forneceu um valor de recalque final de 14,8 cm; enquanto as placas PR4, PR5 e PR6 apresentaram, respectivamente, recalques de 14,6 cm, 15,7 cm e 14,9 cm. Os resultados mostraram-se satisfatórios, indicando que o modelo Mohr Coulomb, com os parâmetros adotados, é representativo do solo tratado.

Confrontando-se os resultados numéricos com os resultados experimentais (Figura 16), observa-se que as análises numéricas forneceram um valor de recalque final máximo de 14,8 cm, no centro da base do aterro, enquanto o perfilômetro indicou um recalque final máximo próximo à saia da direita do aterro teste, no valor de 16,8 cm.

É interessante notar que as análises numéricas apresentaram um resultado que segue o comportamento de aterros sobre solos

compressíveis. Os maiores recalques ocorreram no centro do aterro, pois este é o ponto que recebe integralmente o acréscimo de resistência do aterro (ponto de maior altura). O perfilômetro forneceu uma grande dispersão ao longo da base do aterro, que sugere que o solo tratado ainda não se encontra completamente homogêneo, e sim, com regiões menos deformáveis do que outras. Com o decorrer do tempo, espera-se uma maior homogeneização do solo tratado, e maior uniformidade dos deslocamentos verticais.

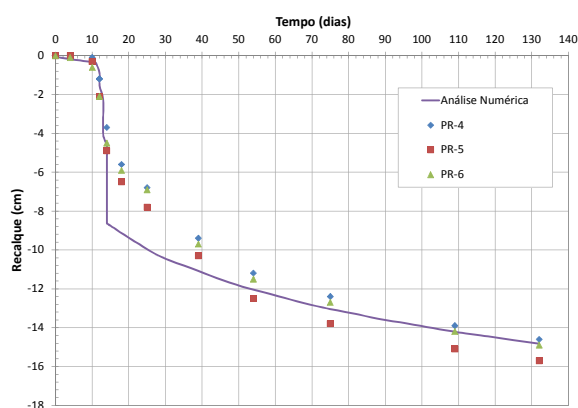


Figura 15. Comparação entre a previsão numérica e os resultados experimentais das placas de recalque: Aterro Teste B

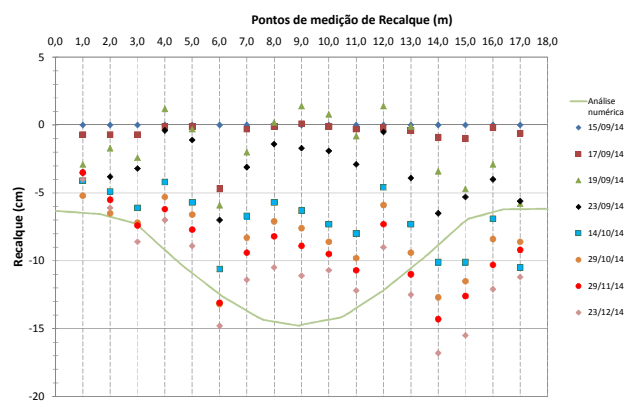


Figura 16. Comparação entre a previsão numérica e os resultados experimentais do perfilômetro: Aterro Teste B

Tendo em vista que o solo sem tratamento apresenta uma deformabilidade variável com a profundidade (Figura 11), o tratamento implicaria em ganhos de rigidez diferentes ao longo da profundidade como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Ganhos de rigidez com a profundidade previstos numericamente

Profundidade (m)	E (kPa) Solo sem tratamento	E (kPa) Solo com tratamento	Ganho de rigidez
0 – 2	150	6.000	4.000%
2 – 4	200		3.000%
4 – 6	400		1.500%
6 – 8	1200		500%

De forma a quantificar o ganho de rigidez total do solo de fundação com o tratamento, optou-se por definir uma rigidez equivalente das camadas de solo compressível, definida pelo módulo de deformabilidade equivalente (E_{eq}):

$$E_{eq} = \frac{\sum E_i \cdot H_i}{H_{total}} \quad (1)$$

onde:

E_{eq} = rigidez equivalente;

E_i = rigidez da camada i ;

H_i = altura da camada i ;

H_{total} = somatório da altura das camadas.

A Equação 1 fornece um valor de módulo de deformabilidade equivalente igual a 487,50kPa, indicando que o ganho de rigidez da camada de solo compressível com o tratamento seria de aproximadamente 1.200%.

O aumento da rigidez do solo de fundação com o tratamento foi comprovado com a redução expressiva dos deslocamentos verticais (recalques) e horizontais medidos pelos diferentes instrumentos, quando se utiliza a técnica de consolidação profunda radial (CPR Grouting).

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou numericamente o comportamento de dois aterros experimentais instrumentados (aterro teste A e aterro teste B), localizados em área de uma construção no bairro do Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro (RJ). O aterro teste A foi construído sobre uma camada de argila mole de 8,0 m de

espessura, onde foram instalados geodrenos para a aceleração dos recalques. Na área do aterro teste B, também construído sobre uma camada de argila mole de 8,0 m de espessura, foi realizado o tratamento do solo compressível através da técnica de Consolidação Radial Profunda (CPR *Grouting*), de forma a minorar e acelerar os recalques previstos em projeto.

A partir das análises numéricas com o modelo Mohr Coulomb, foi possível definir o ganho de rigidez do solo tratado, que foi da ordem de 1.200%. Esse aumento no módulo de deformabilidade do solo tratado, diminuindo a compressibilidade do material composto, também foi verificado na instrumentação de campo, que indicou deslocamentos horizontais e verticais significativamente inferiores no material tratado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Engegraut, pelo apoio ao projeto de pesquisa, representado pela execução dos aterros experimentais e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S. e Riccio, M. Ground improvement of extremely soft soils in Rio de Janeiro. International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), University of Wollongong, Austrália, 2012.
- Almeida, M. S. S.; Crespo Neto, F. N.; Marques, M. E. S. “Relatório Geotécnico – Ensaio de Campo e Laboratório na Área do SESC, Barra da Tijuca – RJ”, 2001.
- Chavão, A. O. (2015). Avaliação da eficiência da técnica de consolidação profunda radial CPR *Grouting* no tratamento de solos compressíveis. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 126p.
- Engegraut. Material publicitário, [obtido em julho de 2015].